UE MEMS
TP 2
Dimensionnement d'un capteur d'accéleration et de son circuit de mesure

Dimitri Galayko

1 Introduction

Ce TP représente la première partie du travail de conception d'un système complet permettant de mesurer l'accélération. Ce système est composé des parties suivantes :

– Le capteur mécanique composé de résonateur et de transducteurs électrostatiques associés,

– Le circuit d'interface permettant de mesurer la valeur de la capacité du transducteur qui représente le déplacement instantané de la masse mobile,

– Le circuit de conversion / asservissement permettant de numériser le signal et d'améliorer les performances intrinsèques du capteur électromécanique.

Dans cette partie, nous allons concevoir et tester les deux premiers blocs de cette architecture.

La géométrie du dispositif mécanique est inspirée de l'article [1]. Cet article vous est distribué, vous êtes invités à le lire.

2 Dimensionnement du capteur

2.1 Dimensionnement du résonateur

Le résonateur est composé d'une masse mobile et des ressorts de suspension.

D'après la table 1 de l'article [1], la masse mobile peut être vue comme une "brique" 120 μm de hauteur, et 3 mm $\times$ 5 mm de surface. Etant donné la densité volumique du silicium de 2300 $kg \cdot m^{-3}$, nous obtenons pour la masse la valeur de $m = 4.14e - 6$ kg.

La masse joue un très grand rôle dans la mesure de l'accélération, dans la mesure où l'accélération ne se manifeste qu'à travers la force inertielle qui est proportionnelle à la masse ($m \cdot a_{ext}$). Pour cette raison, la masse d'accéléromètre est toujours relativement grande.

La géométrie de la partie mobile est dimensionnée de sorte à avoir un résonateur à facteur de qualité de 0.3. Un facteur de qualité aussi faible permet d'avoir un système de type "filtre passe-bas". La fréquence de coupure ciblé est de 500 Hz

A faire : Calculez la valeur de la raideur du ressort (k) permettant d'obtenir cette fréquence de coupure et ce facteur de qualité.

Une fois la constante de raideur calculée, on peut dimensionner les ressort. On se base sur la fig. 2 de l'article [1]. On voit que le ressort est réalisé à partir de 4 poutres fonctionnant en mode "guidée" (cf. la table présentée en cours 2).

A faire : Sachant que la hauteur des ressorts est fixé à 120 μm, trouvez le rapport de forme des deux autres dimensions du ressort.

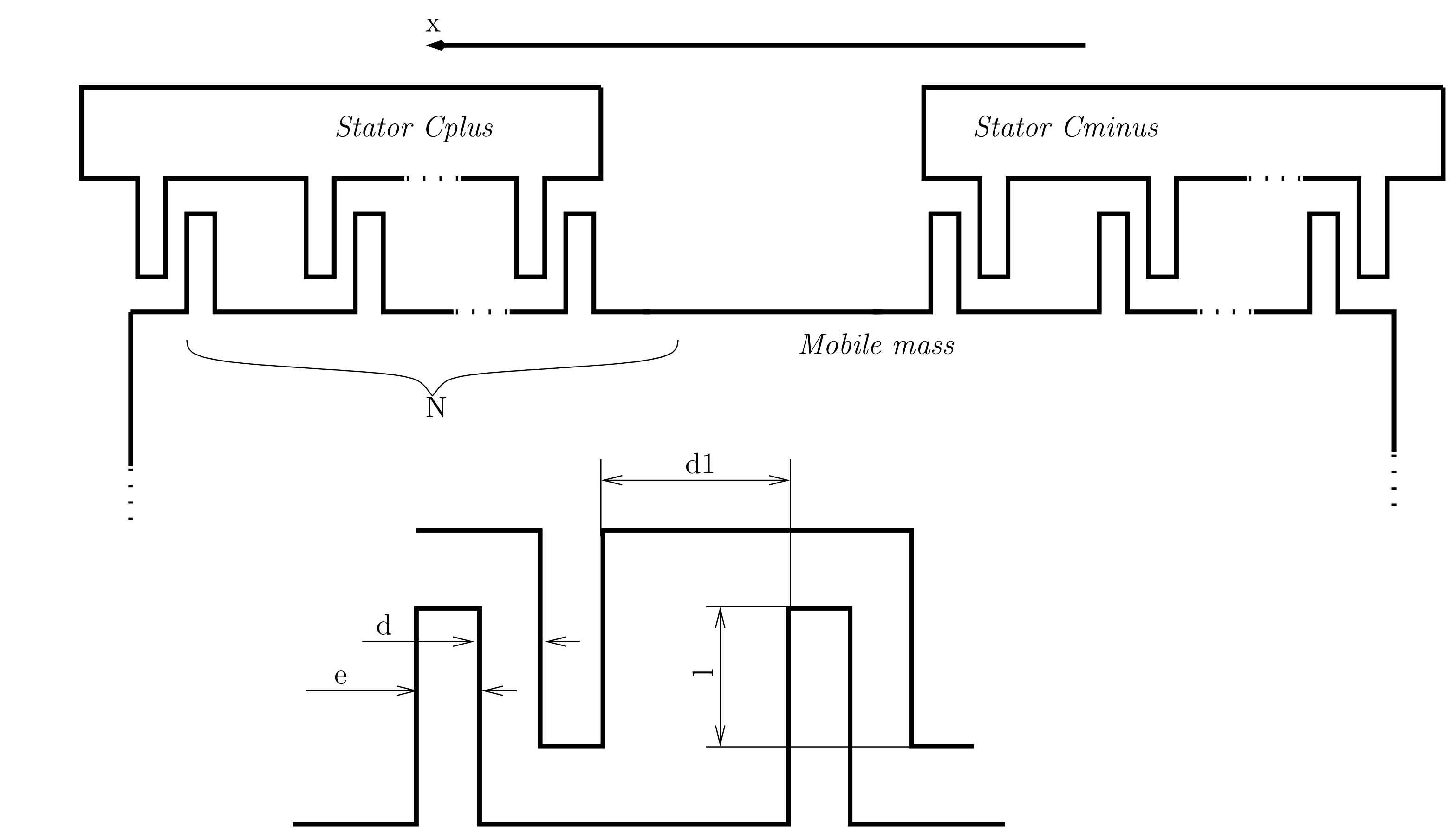


FIGURE 1 – Géométrie des capacités variables

2.2 Dimensionnement des capacités variables

D'après le dessin de la fig. 2, il y a deux paires identiques de capacités variables (une en haut et une en bas du dessin). Une vue élargie d'une de ses paires est donné fig. 1. On voit, que lorsque la masse mobile se déplace vers la gauche (dans le sens conventionnel positif), la capacité de gauche (C_{plus}) augmente, la capacité de droite (C_{moins}) diminue. Cette variation différentielle peut être mesurée par des circuits électroniques appropriés.

Les dimensions des capacités sont données fig. 1. Nous vous proposons les valeurs suivantes :

d=4 μm, d1=10 μm, l=100 μm, e=4 μm, N=150.

Il faut également savoir, il y a deux paires, ainsi, la valeur de chaque capacité donné sur la fig. 1 est multipliée par deux.

A faire : Calculez la valeur des deux capacités variables au repos. Donnez les valeurs des capacités pour déplacement 1, 2 et 3 μm.

A faire : En supposant que le déplacement maximal de la masse mobile est de 3 μm (3/4 du gap), donnez la valeur maximale de l'accélération qu'un tel système est capable de mesurer.

2.3 Test de comportement mécanique

Dans cette partie, on définira la netlist du modèle de capteur électromécanique en utilisant le modèle VHDL-AMS d'un résonateur assorti d'un transducteur unique que nous avons étudié en TP1. Dans le nouveau système, il y a deux transducteurs, et non plus un. Ces transducteurs génèrent deux forces opposées à la masse mobile. Le schéma équivalent électrique du système est donné fig. 2. Notez que les sources de forces sont branchées "tête-bêche", pour représenter d'une part, l'action

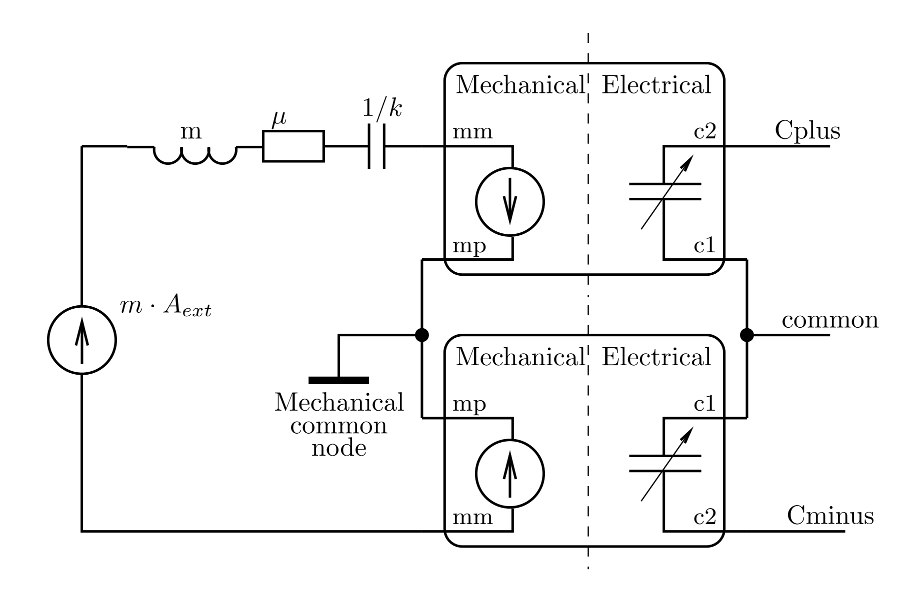


FIGURE 2 –

opposée des forces générées par les transducteur, d'autre part, le fait que les déformation des deux transducteurs se font nécessairement dans les sens opposés.

Le modèle du nouveau dispositif, appelé *MEMS_accelerometer*, vous est fourni, avec des commentaires abondants.

L'accélération externe est modélisée par la force apparente qu'elle génère sur la masse $m \cdot A_{ext}$.

A faire : En complétant le fichier de netlist test_mechanique.cir, modélisez le résonateur soumis à une accélération externe constante de $1g$. Les terminaux électriques sont connectés à la masse (on ne s'intéresse qu'à la partie mécanique). Observer le processus transitoire. Quelle est la position asymptotique de la masse mobile ? Quelle sont les valeurs correspondantes des capacités ? **A faire :** Calculez le facteur de transduction "intrinsèque" du dispositif MEMS :

$$\gamma = \frac{C_{plus} - C_{minus}}{A_{ext}} \tag{1}$$

Le rôle de l'électronique sera de mesurer cette différence de capacités.

3 Mesure de la capacité

Dans cette partie, on va mettre en oeuvre un circuit de mesure de la capacité différentielle. On testera deux architectures : l'une utilisant la technique de détection synchrone et l'autre utilisant la technique des capacités commutées.

3.1 Mesure par détection synchrone

Pour mesurer la capacité, on va monter le circuit donné fig. 3. Les paramètres de ce circuit sont les suivants :

La fréquence des signaux vaut 100 kHz

La fréquence de coupure du filtre est de 1kHz,

L'amplitude des tesions *vp* et *vm* sont de 1 V.

Vous décrirez la netlist du circuit en complétant le fichier accelerometer_detection_synchrone.cir.

A faire : Calculez la formule donnant le rapport entre l'accélération et la tension de sortie. Validez par modélisation avec une accéleration d'entrée d'amplitude de 1 g, sinusoïdale, de fréquence 100 Hz.

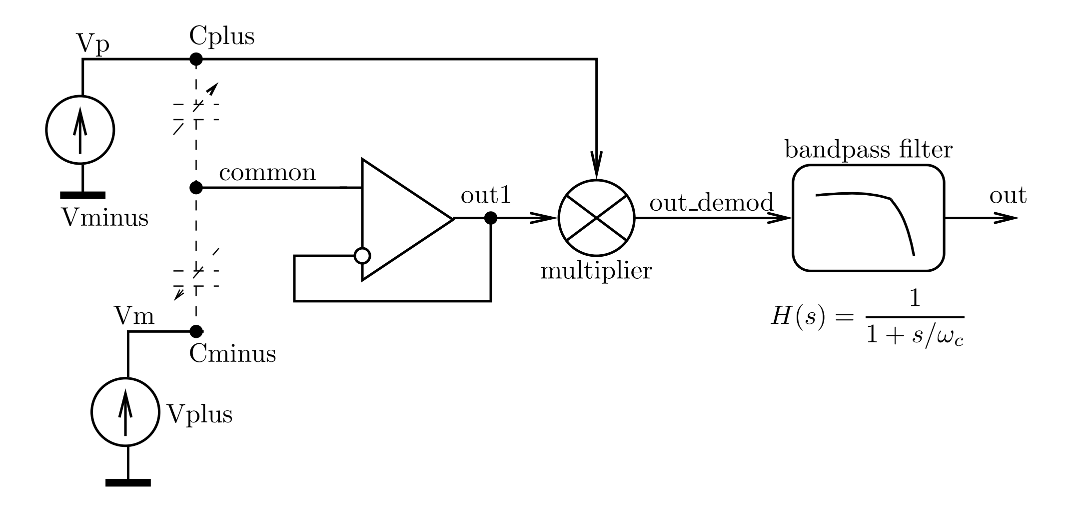


FIGURE 3 – Schéma de principe du circuit mesurant une capacité différentielle par détection synchrone.

A faire : Que se passe-t-il si le noeud d'entrée non-inverseuse de l'amplificateur (common) possède une capacité parasite ou une résistance reliant ce noeud à la masse ? Modélisez en ajoutant entre cette entrée et la masse une résistance Rin=1 MOhms.

3.2 Mesure par technique de capacité commuté

Maintenant on étudie le circuit donné fig. 4.

Les switches commutent à fréquence 50 kHz, la valeur des tensions vp et vm sont continue et valent +1 et - et -1 V.

Le nouveau système est modélisé dans le fichier accelerometer_capacom.cir. Les switches commandés sont réalisé par des modèles macroscopiques d'Eldo "voltage controlled switch". Pour les détails (interfaces, paramètre...), vous êtes invités à consulter le manuel d'utilisateur d'Eldo qui se trouve dans l'arborescence des outils de mentor Mentor.

Vous donnerez une valeur de 10 p à la capacité C_measure.

A faire : Calculez la formule donnant le rapport entre l'accélération et la tension de sortie. Validez par modélisation avec $a_{ext} = 1...4g$.

A faire : Quelle accélération provoque un déplacement de 3 μm ? Appliquez cette accélération et observez le phénomène de pull-in.

A faire : Comment faut-il modifier le circuit (les paramètres) pour éviter le pull-in et ainsi pour mesurer des accélérations provoquant un déplacement jusqu'à 3 μm.

A faire : Ajouter au circuit un dispositif échantillonneur-bloqueur échantillonné d'une manière appropriée (pour cela vous devrez générer une horloge à part).

A faire : Appliquez une accélération sinusoidale d'amplitude 0.2g et de fréquences 100, 300, 400, 600, 900 Hz. Dessinez la fonction "coefficient de transfert global=tension en sortie/amplitude d'accélération en entée" en fonction de la fréquence de l'accélération en entrée, et concluez sur le fonctionnement de l'accélérateur à hautes fréquences.

4 Bibliographie

[1] B. V. Amini, R. Abdoulvand, F. Ayazi, A 4.5-mW closed-loop ΣΔ micro-gravity CMOS SOI accelerometer, IEEE journal of solid state circuits, vol. 41, no. 12, december 2006

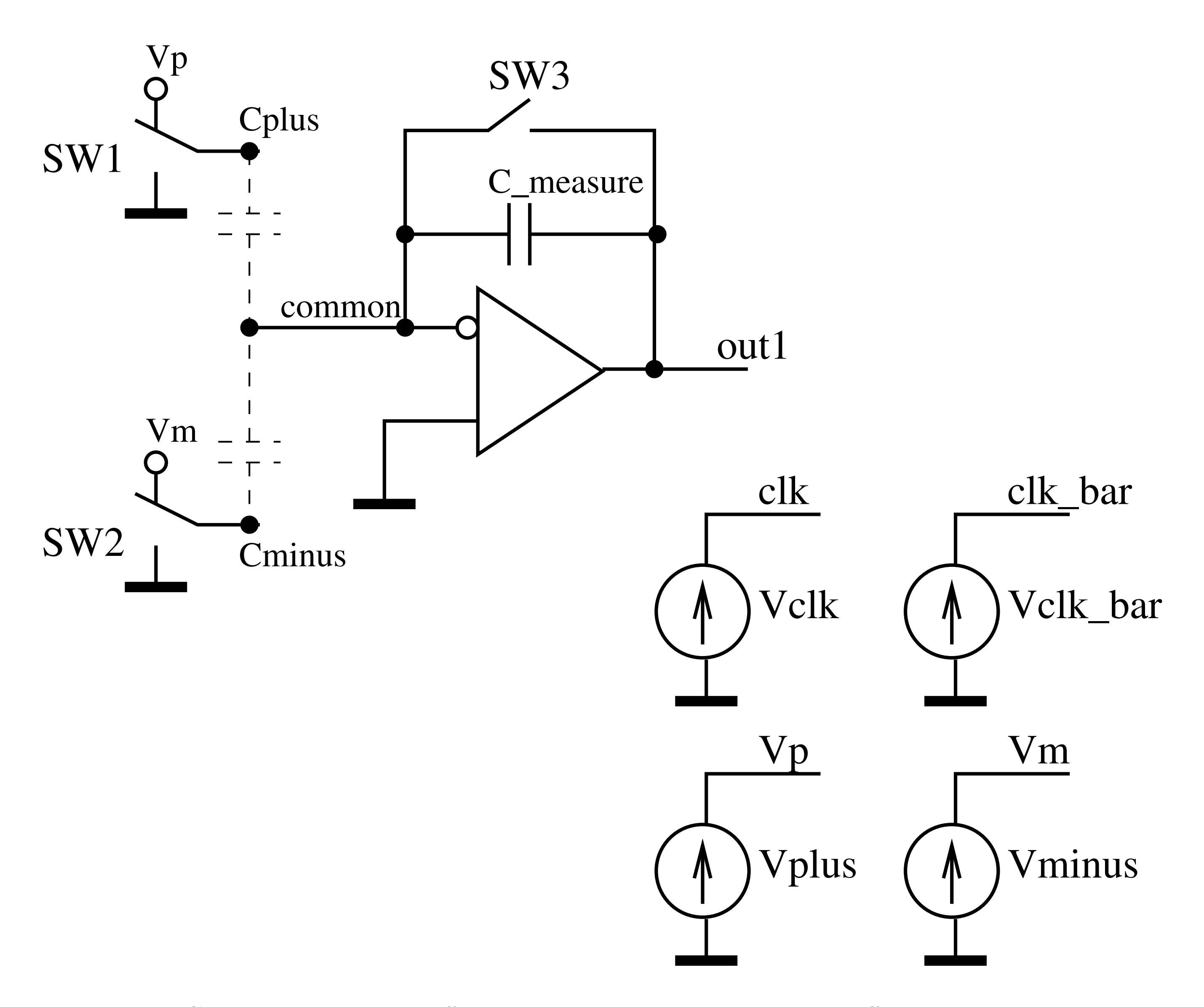


Figure 4 – Circuit permettant d'effectuer une mesure d'une capacité différentielle par la technique des capacités commutées. Les positions des switches présenté sur le schéma correspondent à la phase 1 (état haut) de l'horloge clk. L'horloge clk_bar est le complément numérique de l'horloge clk. L'état haut de clk_bar met les switches dans les positions opposées à celles données sur le schéma.